

基于模糊滑模变结构的直流伺服系统控制器设计

冉 鸿 陈 静, 罗 洪

(国网重庆武隆县供电有限责任公司, 重庆 408500)

摘要: 针对直流伺服系统中参数时变性和外部扰动等造成的电机模型变化, 设计了一种采用滑模变结构控制策略来控制直流伺服电机的方法, 并且对系统稳定性进行了分析。为了削弱抖振, 采用模糊控制方法将切换控制模糊化。对所设计的模糊滑模变结构控制系统进行仿真表明, 采用模糊控制能大大削弱系统抖振, 另外对具有电机参数大范围摄动的系统, 滑模变结构控制系统具有较强的鲁棒性和快速性。

关键词: 模糊控制; 滑模变结构; 直流伺服电机

Abstract: Aiming at the change of motor model caused by time variation of parameters and external disturbances in DC servo-system, a control strategy based on sliding mode variable structure is designed to control DC servomotor, and the system stability is analyzed. In order to weaken the chattering, the fuzzy control method is used to fuzzy the switching control. Then, the simulation of the designed control system with fuzzy sliding mode variable structure shows that the fuzzy control can greatly weaken the chattering of the system, and for motor parameter perturbation system, the control system with sliding mode variable structure has a stronger robustness and fast response.

Key words: fuzzy control; sliding mode variable structure; DC servomotor

中图分类号: TM762 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0042-03

0 引 言

滑模变结构控制近年来已被广泛应用于处理一些复杂的线性系统、非线性系统、时变、多变量耦合等确定性和不确定性系统, 可使系统获得良好的动态品质。而对于高性能的直流伺服系统, 一般要求精度高、无超调、响应速度快且鲁棒性好^[1-3]。针对直流伺服系统的要求, 采用滑模变结构控制方法。但是, 滑模变结构控制在本质上的不连续开关特性, 会引起系统的一种抖振现象, 严重时, 影响系统正常运行, 还可能激发系统未建模部分。

模糊控制是近年来发展比较迅速的智能控制策略的分支之一, 它不依赖于被控对象的精确数学模型, 能够克服非线性因素的影响, 对调节对象的参数变化具有较强的鲁棒性, 在很多不确定的复杂模型场合得到了成功的应用。

基于以上优点, 采用模糊控制和滑模变结构控制相结合的复合控制方法。并且针对直流伺服系统设计了模糊滑模控制器, 该控制器具有较强的鲁棒性, 并能大大削弱系统的抖振。

1 滑模变结构控制器设计

直流伺服系统的结构框图如图 1 所示, 虽然在多数情况下常把电机的参数看成常数, 但实际当转速在大范围内变化时, 电机的参数并非常数, 而滑模控制正好对参数的变化不太敏感, 故使用这种控制方式来控制电机具有很大的优越性。

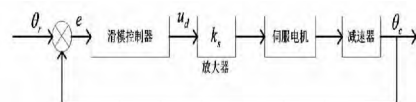


图 1 直流伺服系统的结构框图

1.1 直流伺服系统及其数学模型

直流电机的等效电路如图 2 所示, u_d 为电枢两端电压; e_a 为电枢回路反电动势; r_a 为电枢回路总电阻; L_a 为电枢绕组电感; k_e 为电势常数; k_t 为转矩常数; J 为转动惯量; $k_e' = \frac{60}{2\pi} k_e$ 。

由图 2 可得直流伺服电机的传递函数为

$$\frac{\omega(s)}{u_d(s)} = \frac{1/k_e'}{(T_m s + 1)(T_e s + 1)} \quad (1)$$

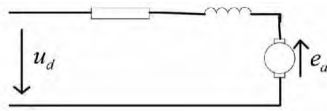


图 2 直流电机的等效电路图

式中 $T_m = \frac{r_a J}{k_t k_e}$ 为电机的机械时间常数; $T_e = \frac{L_a}{r_a}$ 为电机的电气时间常数。

通常,因电枢绕组的电感很小,以致电气时间常数 T_e 很小,而电机电枢转子又有一定的转动惯量,机械时间常数 T_m 就比电气时间常数大得多,所以往往可略去电机的电气过渡过程,电机的传递函数可写为

$$\frac{\omega(s)}{u_d} = \frac{1/k'_e}{(T_m s + 1)}$$

则整个直流伺服系统中广义对象的传递函数为

$$\frac{\theta(s)}{u_d} = \frac{k_s i}{k'_e s (T_m s + 1)} \quad (2)$$

式中 k_s 为功放系数; i 为减速器减速比。

选择状态变量为

$$x_1 = \theta_r - \theta_c, \quad \dot{x}_2 = x_2$$

设系统负载为零;系统的给定角位移为阶跃信号,有 $\dot{\theta}_r = \ddot{\theta}_r = 0$ 系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -b \end{pmatrix} u \quad (3)$$

其中 $a_1 = 0$, $a_2 = \frac{1}{T_m}$, $b = \frac{k_s i}{k'_e T_m}$, $T_m = \frac{J r_a}{k'_e k_t}$ 。

1.2 滑模变结构控制的基本问题

设有一个系统

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, u, t) & x \in R^n, u \in R^m \\ y = h(x) & y \in R^l, n \geq m \geq l \end{cases}$$

确定一个切换函数矢量 $s = s(x)$, $s \in R^m$, 求解控制函数为

$$u_i = \begin{cases} u_i^+(x) & s_i(x) > 0 \\ u_i^-(x) & s_i(x) < 0 \end{cases}$$

其中, $u_i^+(x) \neq u_i^-(x)$ ($i = 1, \dots, m$) 使得

(1) 滑动模态存在;

(2) 满足可达性条件: 在切换面 $s_i(x) = 0$ ($i = 1, \dots, m$) 以外的状态点都将于有限时间内到达切换面;

(3) 滑模运动的稳定性。

满足该 3 个条件的控制叫做滑模控制变结构控

制^[1]。

1.3 切换函数 s 的选取

滑模变结构位置控制器设计包括滑动面设计和滑模控制律设计,直流伺服系统为常系数二阶系统,取切换函数为

$$s = cx_1 + x_2 \quad c > 0$$

1.4 控制量 u 的求取

变结构控制设计的目标是靠切换面和控制量的选取来保证的,切换面的选取影响系统的稳定性,而控制量的选取主要确定滑动模态的存在性和可达性。因此,求取控制量时必须满足滑动模态存在性和可达性,即使 $sd_s/d_t > 0$ 成立^[4]。采用模糊控制策略,其控制量的形式为

$$u = u_{eq} + k u_{ss} \quad (4)$$

K 为模糊系数。

系统处于滑模面上有 $\dot{s} = 0$ 即

$$\frac{ds}{dt} = c\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = 0 \quad (5)$$

将式(3)代入式(5)可得等效控制为

$$u_{eq} = \frac{1}{b}(c - a_2)x_2 \quad (6)$$

为抑制不确定性和外加干扰,确保系统鲁棒性,选择切换控制为

$$u_{ss} = \frac{1}{b}\eta \text{sign}(s) \quad \text{其中 } \eta > 0 \quad (7)$$

1.5 系统稳定性分析

为了使系统正常启动滑动模态,要求运动点在有限的时间内到达切换面 $s = 0$ 。根据可达条件 $\dot{s} < 0$, 令李雅普诺夫函数为

$$V(x) = \frac{1}{2}s^2 > 0, s \neq 0 \quad (8)$$

对时间 t 求导数可得

$$\dot{V}(x) = \frac{1}{2}s\dot{s}$$

$$\dot{V}(x) = s(c\dot{x}_1 + \dot{x}_2) \quad (9)$$

将式(3)和式(4)代入式(9)得

$$\dot{V}(x) = -k\eta|s| \quad (10)$$

据以上分析,当 $k > 0$, $\eta > 0$ 时, $\dot{V}(x) < 0$, 则滑模变结构控制在李雅普诺夫意义下是渐进稳定的。

2 模糊控制器设计

根据滑模控制原理,滑模控制器由等效控制和

切换控制两部分组成,即 $u = u_{eq} + ku_{ss}$,通过模糊系数 k 将切换控制模糊化。当 $k=0$ 时,此时控制律只由等效控制项构成,当 $k \neq 0$ 时,此时控制律等效控制和切换控制构成,通过模糊输出 k 实现切换控制项 u_s 的模糊化,从而有效地降低抖振。

2.1 模糊化

模糊控制器的输入变量为 $S, S = \beta s$,其论域为 $[-1, 1]$ 输出变量为 k ,其论域为 $[-1, 1]$,则在各自论域上划分为不同的语言变量为

$$L(s) = \{N, Z, P\}$$

$$L(k) = \{N, Z, P\}$$

输入变量 S 和输出变量 k 的隶属度函数分别如图 3、图 4。

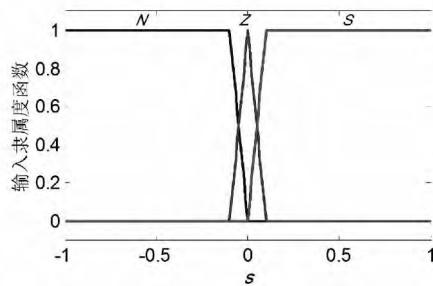


图 3 输入变量 S 的隶属度函数

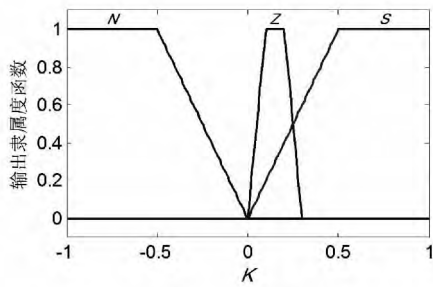


图 4 输出变量 k 的隶属度函数

2.2 模糊规则

模糊推理采用单输入单输出的一维模糊控制器结构。模糊控制规则的设计原则为:保证滑模存在和可达性条件 $s\dot{s} < 0$ 成立^[4]。

模糊推理规则为

If s is N then k is P

If s is Z then k is Z

If s is P then k is P

对上述规则按 Mamdani 推理方法进行推理,便可得到 k 输出信号。

2.3 反模糊化

为了获得准确的控制量,这里采用面积重心法进行反模糊化。它是取隶属度函数曲线与横坐标围

成面积的重心为模糊推理的最终输出值,即

$$k_0 = \frac{\int_K ku_k(k) dk}{\int_K u_k(k) dk}$$

这样,通过模糊推理可得到 k 的大小。

3 仿真与结论

为了验证上述模糊滑模控制器,对直流伺服系统进行仿真。使用 Matlab/Simulink 搭建仿真模型。

直流伺服系统各参数为: $k_s = 20, i = 0.1, r_a = 0.9 \Omega, J = 0.5, k_e = 0.103$ 。由此求得系统状态方程的各系数为: $a_1 = 0, a_2 = 2.16, b = 4.35$ 。若选 $c = 8, \eta = 125$ 。

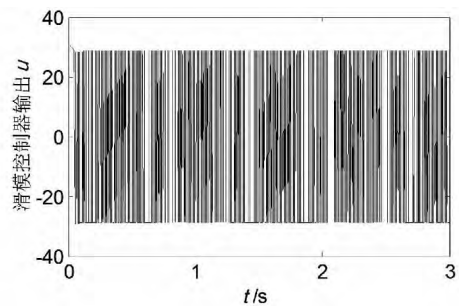


图 5 传统控制下控制输入(k=1)

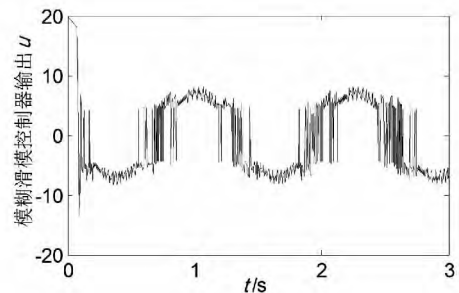


图 6 模糊切换控制时控制输入(k≠1)

由图 5 在传统滑模控制下,其控制器输出 u 处于高频振荡。由图 6 可知,采用模糊控制对切换控制模糊化,其模糊滑模控制器输出的抖振大大被削弱,进而对于直流伺服电机的控制将更加平稳。

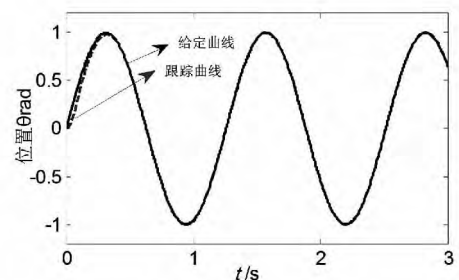


图 7 模糊滑模控制时的位置跟踪(k≠1)

(下转第 85 页)

参考文献

[1] GB 12348 - 2008 ,工业企业厂界环境噪声排放标准 [S].

[2] 中国环境监测总站.《工业企业噪声排放限值及测量方法》讨论稿[R].

[3] 金庆先. 背景噪声在边界噪声测量中的影响及修正 [J]. 中国环境监测 2000 ,16(2) :110.

[4] 杨云,王庭佛. 关于噪声测试中背景噪声修正方法的探讨 [J]. 噪声与振动控制 2000(1) :24 - 26.

[5] 戴建红. 工业企业厂界噪声监测过程中的问题探讨 [J]. 中国环境监测 ,2006 ,22(2) :34 - 36.

[6] 彭守礼,杨捷. 背景噪声的测量和用于修正计算的问题分析及建议 [J]. 环境导报 ,1997 ,14 (5) :17 - 19.

[7] 徐建平,翁祖峰. 厂界噪声背景值修正 [J]. 环境监测管理与技术 2005 ,17(6) :46.

[8] 林汉杰,方俊雄. 厂界噪声背景值修正问题的讨论 [J]. 中国环境监测 2001 ,17(2) :54 - 56.

[9] 敖春. 如何实施工业企业厂界噪声的规范性监测 [J]. 环境科学与技术 2003 ,26(B12) :10 - 11.

[10] GB/T 3222. 11 - 2006 ,声学环境噪声的描述、测量与评价第 1 部分:基本参量与评价方法 [S].

[11] ISO1996) 1:2003 ,Acoustics - Description , Measure - ment and Assessment of Environmental Noise ,Part 1: Basic Quantities and Assessment Procedures [S].

[12] 马大猷. 噪声控制学 [M]. 北京:北京科学出版社 ,1987.

作者简介:

叶春燕(1983),硕士研究生,工程师,主要从事电磁环境监测及治理工作。

(收稿日期:2013 - 12 - 15)

(上接第44页)

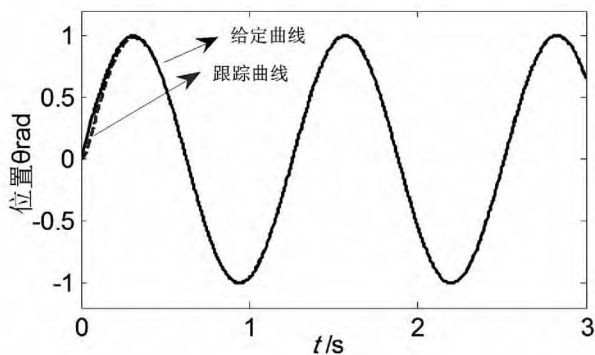


图8 参数摄动50%时模糊滑模控制的位置跟踪

由图7可知,采用模糊滑模控制直流伺服电机能很好地响应给定位置,且响应速度快,几乎无稳态误差。由图8可以看到,当有电机参数摄动50%时,模糊滑模变结构控制系统能适应系统参数的变化,响应时间很快,并能很快跟踪上,由此可见,所设计的模糊滑模控制系统具有较强的鲁棒性。

4 结 语

通过对直流伺服系统分析,并对其设计了滑模变结构控制策略,设计方法简单,易于实现。从仿真分析可知,滑模变结构控制能较强抑制参数摄动,自适应强。另外合理地选择切换函数和控制律参数,

滑模变结构控制系统具有快速性好、无静差的优良动态性能,而且系统参数摄动时,具有很好的鲁棒性。并且采用模糊滑模控制大大减弱了系统的抖振现象。

参考文献

[1] 王丰尧. 滑模变结构控制 [M]. 北京:机械工业出版社出版,1995.

[2] 杨树兴,李擎,苏中,等. 计算机控制系统——理论与技术与应用 [M]. 北京:机械工业出版社,2007.

[3] 李晓秀,章兢. 滑模变结构控制及其在直流伺服系统中的应用 [J]. 湖南工程学院学报:自然科学版,2004,14(3):5 - 7.

[4] 安树,杨新霞. 无刷直流电动机模糊滑模变结构控制的研究 [J]. 计算机仿真,2010,27(4):172 - 175.

[5] 黄飞. 永磁同步电机位置伺服系统的滑模控制 [J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2011,30(4):860 - 863.

[6] 张涌松,舒志兵. 基于永磁同步电机的滑模变结构仿真研究 [J]. 机床与液压,2008,36(7):288 - 292.

作者简介:

冉 鸿(1975),电气工程师,研究方向为电力系统自动化、清洁能源与并网技术;

罗 洪(1972),电气工程师,研究方向为清洁能源与并网技术。

(收稿日期:2013 - 11 - 07)